

## Удосконалення контуру регулювання струму однофазного багатофункціонального мережевого інвертора фотоелектричної системи

О. О. Шавьолкін, Джасім Мохмед Джасім Джасім, І. О. Шведчикова

*Розглянуто удосконалення контуру регулювання струму багатофункціонального мережевого інвертора системи електроживлення локального об'єкту. Метою дослідження є забезпечення відповідності стандартам якості струму мережі у всьому діапазоні його значень для спільної точки підключення навантаження, розподільчої мережі змінного струму і перетворювального агрегату фотоелектричної системи. Запропоновано використання релейного регулювання струму з комбінуванням уніполярної і біполярної модуляції в поєднанні з модифікованим алгоритмом перемикання ключів інвертора. Показано, що за нелінійного навантаження стрибкоподібна зміна похідної завдання струму інвертора призводить до різкої зміни частоти перемикання ключів. Це спричиняє появу «брижі» у струмі мережі, що погіршує його гармонійний склад за малих значень.*

*За нелінійного реактору зі збільшенням струму інвертора «сплеск» також обумовлено змінюванням частоти перемикання ключів. Це відбувається на ділянках зростання (спадання) струму внаслідок змінювання індуктивності реактора. Встановлена залежність заданого відхилення для релейного регулятора, що за лінійного реактору забезпечує практично постійну частоту перемикання ключів інвертора. Запропоновано враховувати похідну сигналу завдання струму інвертора при формуванні значень відхилень релейного регулятора, що дозволить виключити стрибкоподібне змінювання частоти перемикання ключів. Показана необхідність врахування несинусоїдальної напруги мережі при визначенні напруги на вході інвертора. Запропоновано структуру контуру регулювання струму з релейним регулятором струму за комбінованою модуляцією з завданням значення відхилення. Регулювання здійснюється згідно з заданим значенням амплітуди і похідної струму інвертора. Розроблено математичну модель системи «мережа – мережевий інвертор – навантаження» з блоком визначення втрат потужності в ключах і нелінійному реакторі*

*Ключові слова: релейний регулятор струму, уніполярна та біполярна модуляція, втрати потужності, коефіцієнт гармонік, моделювання системи*

### 1. Вступ

В комбінованих системах електроживлення (КСЕ) локальних об'єктів з поновлювальними джерелами електроенергії (ПДЕ) навантаження об'єкту підключено до точки спільного з'єднання (ТСЗ) розподільчої мережі змінного струму (РМ) 0.4 кВ і перетворювального агрегату (ПА) ПДЕ. У разі фотоелектричної сонячної батареї (СБ) ефективність використання достатньо дорогого перетворювального агрегату за природних умов не перевищує 20% [1]. Більший

час обладнання не використовується або використовується не повністю. Перспективним напрямком є використання багатофункціональних мережевих інверторів (АІН) з суміщеною функцією силового активного фільтра (САФ) [2]. Це сприяє підвищенню експлуатаційного фактору ПА завдяки цілодобовому використанню [2–5] для підтримки максимального (близького до одиниці) коефіцієнта потужності у точці підключення до РМ. Результат – зниження завантаження та втрат енергії в РМ. Також є можливість забезпечувати автономний режим роботи в денні часи [2, 3], стабілізацію напруги навантаження [4]. Таким чином, поліпшення показників ПА для систем з ПДЕ є нагальним завданням і сприяє подальшому розвитку енергетики з розподіленими джерелами електроенергії.

## 2. Аналіз літератури та постановка проблеми

Якість струму, який формується в точці підключення до мережі, визначається контуром регулювання струму (КРС) АІН і його вихідним LC або LCL фільтром. Фільтр забезпечує придушення вищих гармонік. Визначальну роль в придушенні вищих гармонік низького порядку, що генеруються навантаженням, виконує КРС. В роботі [2] виконано огляд схемних рішень і структур керування АІН. З нього випливає, що основні типи структур КРС базуються на використанні пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора, релейного регулятора струму (РРС), ковзного режиму. В [5] стосовно трифазного АІН приведено рішення з регулятором на базі фаззи-логіки.

Порівняно з генерувальними АІН [6], які працюють на РМ і формують синусоїдальний струм з  $\text{THD} < 3.5\%$ , в КСЕ локальних об'єктів з нелінійним навантаженням струм мережевого АІН несинусоїдальний. За цього він компенсує вищі гармоніки низького порядку струму навантаження. Модуляційні складові струму АІН придушуються вихідним фільтром і струм в точці підключення до РМ практично синусоїдальний. Наявність похибки в процесі формування КРС струму призводить до спотворення струму, що формується в мережі. Похибка обумовлює наявність в струмі вищих гармонік низького порядку (3-ї, 5-ї,...). Це ускладнює питання забезпечення відповідності гармонійного складу струму стандартам МЕК [7, 8].

Більш розповсюджені рішення з ШІМ тому, що частота модуляції є постійною. Так, в [9, 10] відхилення струму  $i_c$  відносно заданого значення  $i_c^*$  ( $\Delta i_c = i_c^* - i_c$ ) подається через ПІ-регулятор струму. Однак його ефективність щодо усунення похибки при частоті модуляції 20 кГц недостатня, про що свідчать осцилограми, наведені в [9, 10]. В роботі [2] розглянуто варіанти КРС, в якому до вихідної напруги регулятора струму додається напруга, пропорційна напрузі РМ. Також в [2] розглядаються варіанти з додаванням напруг, що пропорційні  $i_c^*$ ,  $i_c$  та напрузі мережі  $u_1$  до виходу регулятора струму. Однак ефективні ці рішення тільки при достатньо високій частоті модуляції. Так, наприклад, в [6] за використанням в КРС ПІ-регулятора при частоті ШІМ 20 кГц значення  $\text{THD}$  для струму мережі ( $\text{THDig}$ ) становить 4.8 % за амплітуди струму  $I_{gm}=10$  А (амплітуда струму АІН 20 А, нелінійне навантаження 9 А). Проте можливості підвищення частоти модуляції обмежені, оскільки це призведе до збільшення втрат потужності в ключах АІН і зниженню його ККД. Це ж стосується викори-

стання ковзного режиму [11, 12], коли частота модуляції 90 кГц. Прийнятні показники за частоти модуляції 6.8 кГц забезпечують досить складний в реалізації варіант КРС з використанням динамічної компенсації похибки [13].

Варіантом подолання відповідних труднощів може бути використання РРС, який виключає похибку формування струму АІН та забезпечує високу швидкість КРС. Проте частота перемикавання ключів  $f_s$  АІН є змінною. Це може провокувати виникнення коливань у вихідному фільтрі і призводить до «сплеску» у струмі РМ [5], що погіршує його гармонійний склад. Рішення щодо РРС в [2, 14] стосуються використання для мостової схеми АІН біполярної модуляції напруги, коли вихідна напруга АІН  $u_c$  приймає два значення ( $U$ ,  $-U$ ). В цьому випадку  $f_s$  вдвічі більша ніж за уніполярної модуляції. Є спроби вирішити питання стабілізації  $f_s$ . Так, в [15] розглянуто уніполярну модуляцію з постійною  $f_s$  з трьома рівнями напруги  $u_c$  ( $U$ ,  $0$ ,  $-U$ ), але на  $RL$  навантаження за відсутності підключення до РМ. У разі роботи паралельно з РМ використання стану  $u_c=0$  на певних інтервалах часу не забезпечує потрібний закон змінювання струму АІН і є проблемним. Перспективним виглядає рішення з комбінуванням уніполярної та біполярної модуляції [16], але в ньому не передбачається стабілізація  $f_s$ .

При налаштуванні КРС, зазвичай, не враховується залежність індуктивності вихідного реактору АІН від струму. Проте змінювання значення індуктивності може бути достатньо великим – в декілька разів, що впливатиме на показники КРС. В роботі [17] розглядається рішення з регулюванням струму мережі при використанні нелінійного реактора і частоті ШІМ 20 кГц. При цьому струми АІН і завантаження розраховуються з використанням самонавчального алгоритму.

У розглянутих вище рішеннях розглядається робота АІН на мережу з синусоїдальною напругою. В роботі [18] виконано оцінку щодо впливу на гармонійний склад струму вищих гармонік напруги РМ для генеруючого АІН без урахування навантаження. Разом з тим, стандарт [19] допускає несинусоїдальність напруги мережі загального призначення. За цього нормуються припустимі відносні (до основної гармоніки) значення вищих гармонік напруги. Природно, що струм споживачів за цього теж буде несинусоїдальним. Ці гармоніки струму будуть компенсовані мережевим АІН. Виникає питання щодо впливу несинусоїдальності напруги РМ на можливості формування струму АІН без похибки, що потребує певну швидкість змінювання струму АІН і відповідне визначення параметрів його схеми. За наявності конденсатора фільтру в точці підключення до РМ виникає питання щодо вищих гармонік струму конденсатора в разі несинусоїдальної напруги РМ.

Так, в [13] ємність  $C=60$  мкФ, відповідно, амплітуда першої гармоніки становить  $I_{fm(1)}=5.88$  А. У разі, наприклад, відносного значення 13-ї гармоніки напруги РМ в 3% значення  $I_{fm(13)}=13 \cdot 0.03 I_{fm(1)}=2.29$  А. Якщо значення синусоїдального струму, що споживається з РМ  $I_{gm}=2 \div 10$  А, отримати припустиме значення  $THDig \leq 5\%$  неможливо. Обмеження значень вищих гармонік струму, що додаються конденсатором до струму, що формується ПА в точці підключення до РМ, потребує додаткового вивчення.

Отже, питання щодо реалізації КРС мережевих АІН вивчено недостатньо і потребує додаткового дослідження. Перспективним за цього виглядає удоско-

налення системи з РРС, оскільки відсутність похибки у процесі формування струму АІН створює умови для покращення гармонійного складу струму РМ за його малих значень.

### 3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є забезпечення значення  $THD \leq 5\%$  для струму мережі у всьому діапазоні його значень за використання багатофункціонального мережевого АІН. Це досягається шляхом вдосконалення КРС з релейним регулятором.

Для досягнення цієї мети слід вирішити наступні завдання:

- вивчити механізм формування струму АІН при паралельній роботі з РМ і нелінійним навантаженням. Дослідити можливості вдосконалення принципів релейного регулювання струму за комбінуванням уніполярної та біполярної модуляції у разі використання лінійного та нелінійного вихідного реактору АІН;
- вивчити можливості підвищення якості струму мережі в спільній точці у разі несинусоїдальної напруги РМ;
- розробити відповідної структури системи керування АІН;
- розробити математичну модель на ПК системи «РМ – мережевий АІН – навантаження» для перевірки ефективності рішень. Це також розширить можливості вивчення процесів у схемі.

### 4. Дослідження механізму формування струму та реалізація КРС мережевого АІН з комбінованою модуляцією

#### 4.1. Структура силових кіл та визначення параметрів однофазної КСЕ

Структура однофазної КСЕ (рис. 1) містить мережевий АІН за мостовою схемою з вихідним реактором або двома реакторами у кожному виході АІН з сумарною індуктивністю  $L$ .

АІН і навантаження підключені до РМ з напругою  $u_g = U_{gm} \sin \omega t$  ( $U_{gm}$  – амплітуда напруги,  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота,  $f = 50$  Гц). Навантаження активно-індуктивне і нелінійне (некерований випрямляч). Ємнісний фільтр ( $C_f$  з незначним  $R_f$ ) забезпечує придушення вищих гармонік у спільній точці підключення до РМ. Фактично маємо  $LC$ -фільтр, а з урахуванням індуктивності РМ  $L_g$  фактично  $LCL$ -фільтр. Резистор  $R_f$  в колі конденсатору знижує добротність фільтру (зменшення коливальності). До ланки постійного струму АІН підключена сонячна батарея (СБ) з перетворювачем напруги (ПН), що підтримує задане значення напруги  $U$  на вході АІН.

У мостовій схемі АІН можна використовувати біполярну та однополярну модуляцію вихідної напруги. Біполярна модуляція застосовується, якщо рама СБ заземлена і вимагає обов'язкового використання двох реакторів у вихідних колах АІН (рис. 1). Уніполярна модуляція забезпечує найкращий гармонічний склад вихідної напруги і, відповідно, струму. Це дозволяє зменшити частоту модуляції майже вдвічі.

У випадку використання РРС частота перемикання ключів визначається зміною стану контролера, і за рівних умов вона буде вдвічі більшою, ніж для

однополярної ШІМ, але вдвічі менше, ніж для біполярної модуляції. Це викликає необхідність враховувати втрати енергії в ключах АІН.

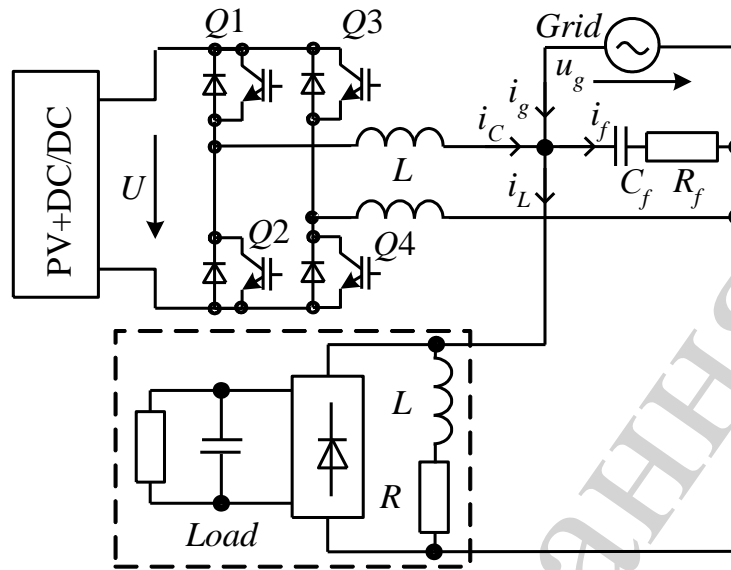


Рис. 1. Структура силових кіл однофазної КСЕ з мережевим АІН

Режим джерела струму за роботи АІН паралельно з РМ передбачає, що  $U = aU_{gm}$  ( $a > 1$ ) [12, 13]. Швидкість змінювання (похідна) вихідного струму АІН  $di_c/dt$  при цьому повинна перевищувати максимальне значення похідної завдання струму  $di_c^*/dt$ .

У разі формування синусоїдального струму максимальне значення похідної завдання струму  $(di_c^*/dt)_{MAX} = \omega I_{CmMAX}$  ( $I_{CmMAX}$  – амплітуда для максимального значення струму АІН). Вважаємо значення індуктивності  $L$  вихідного реактора постійним. Тоді  $di_c/dt$  можна визначити згідно значенню напруги вихідного реактора АІН

$$u_L = u_c - u_g = L \frac{di_c}{dt}. \quad (1)$$

Найменше значення  $u_L$  має місце, коли  $u_g = U_{gm}$ , тоді

$$U_L = U - U_{gm} = L\omega I_{CmMAX}.$$

Звідси

$$a > 1 + \frac{L\omega \cdot I_{CmMAX}}{U_{gm}}.$$

При поєднанні АІН функції САФ і роботі з нелінійним навантаженням форма струму АІН спотворюється при стрибкоподібній зміні  $di_C/dt$ . Отже, значення  $a$  визначатиме можливість забезпечення максимального значення  $(di_C/dt)_{MAX}$  у процесі формування струму без похибки. За цього мінімальне значення

$$\left(\frac{di_C}{dt}\right)_{MIN} = \frac{(a-1)U_{gm}}{L},$$

а максимальне (за  $u_g=0$ ).

$$\left(\frac{di_C}{dt}\right)_{MAX} = \frac{aU_{gm}}{L}.$$

Відносно до напруги РМ значення напруги реактору  $U_L$  (за першою гармонікою) для максимального струму АІН  $I_{CMAX}$  (діюче значення) становить  $b = \frac{U_L}{U_g} = \frac{\omega L \cdot I_{CMAX}}{U_g}$  ( $U_g$  – діюче значення напруги РМ). Індуктивність реактора АІН, виходячи з цього

$$L = \frac{bU_{gm}}{\omega\sqrt{2}I_{CmMAX}}.$$

Отже,  $a > 1 + nb$  і визначає  $di_C/dt$ .

#### 4. 2. Використання релейного регулятора струму у разі комбінованої модуляції вихідної напруги АІН

Незважаючи на характер збурення, РРС практично усуває помилку формування струму у разі забезпечення достатньої швидкості зміни струму АІН.

Напруга мережі  $u_g$  і вихідний струм АІН  $i_C$  зсунуті за фазою на кут  $\theta$ . За цього маємо інтервали, де полярності  $u_g$  і  $i_C$  співпадають. Формування струму на цих інтервалах при уніполярній модуляції є проблемним, оскільки закорочування вихідного кола інвертора через відкриті ключі при вихідній напрузі АІН  $u_C=0$  не забезпечує необхідного за завданням значення  $di_C/dt$ . При цьому виникає потреба міняти полярність напруги АІН. У разі РРС це передбачає використання додаткових рівнів перемикання, але не виключає спотворення форми струму.

Вирішити це питання дозволяє комбінований принцип формування струму АІН [16] з переходом від уніполярної до біполярної модуляції.

Біполярна модуляція здійснюється в симетричній відносно точки зміни полярності  $u_g$  зоні кутів до  $30^\circ$  при малих значеннях струму АІН. Так що це не призведе до істотного збільшення втрат енергії в ключах АІН.

#### 4. 3. Визначення параметрів РРС

Розглянемо можливість реалізації РРС з постійною частотою перемикання ключів  $f_s$ . Це можливо за постійного значення індуктивності реактору. Процес формування струму АІН  $i_C$  при уніполярній модуляції ілюструє рис. 2.

Для спрощення вважаємо задане значення струму АІН  $i_C^*$  на певному інтервалі часу постійним. Перемикання стану АІН здійснюється за досягненням відхилення струму  $|\Delta i_C| \geq \delta$  ( $\delta$  – задане значення відхилення). Амплітуда пульсацій струму  $\delta = \Delta I_{Cm} = \Delta I_C / 2$  відносно заданого значення визначається коефіцієнтом заповнення імпульсів напруги АІН  $\gamma = t_{on} / T$  ( $t_{on}$  – час вмикання ключа,  $T$  – період перемикання).

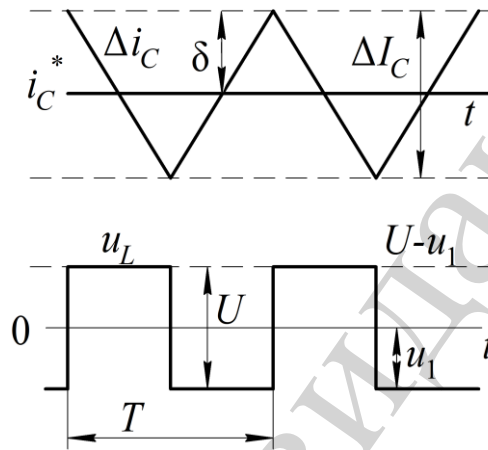


Рис. 2. Робота РРС за уніполярної модуляції

Залежності  $\gamma(t)$  і  $\Delta I_{Cm}(t)$  можна визначити за умови  $\int_0^T u_L dt = 0$ . Так, для  $u_C > 0$  маємо

$$U_{gm} (a - \sin \omega t) \gamma + U_{gm} (0 - \sin \omega t) (1 - \gamma) = 0.$$

$$\text{Звідси } \gamma = \frac{\sin \omega t}{a}.$$

Амплітуда відхилення струму

$$\Delta I_{Cm} = \frac{\gamma(1-\gamma)aU_{gm}}{2Lf_s}.$$

З урахуванням значення  $\gamma$  отримуємо

$$\Delta I_{Cm}(t) = \frac{U_{gm}}{a \cdot 2Lf_s} (a \sin \omega t - 0.5 + 0.5 \cos 2\omega t).$$

Для негативної напівхвилі напруги АІН  $u_C < 0$  маємо аналогічну картину. Згідно цього у загальному випадку

$$\delta = \Delta I_{Cm}(t) = \frac{U_{gm}}{a \cdot 2Lf_s} (|a \sin \omega t| - 0.5 + 0.5 \cos 2\omega t) = \frac{U_{gm}}{a \cdot 2Lf_s} A(t). \quad (3)$$

Аналогічним чином можна визначити залежність  $\delta(t)$  за біполярної модуляції, коли  $u_C$  приймає значення  $U$  і  $-U$

$$\delta_2(t) = \frac{aU_{1m}}{4Lf_s} \frac{(a^2 - \sin^2 \omega t)}{a^2}.$$

З урахуванням того, що біполярна модуляція здійснюється в вузькій зоні, коли значення  $\delta_2(t)$  близьке до максимуму, достатнім буде використовувати його фіксоване значення.

Порівняно з уніполярною ШІМ, використання РРС має особливості, оскільки частота перемикачів ключів відповідає частоті перемикачів регулятора  $f_s$ .

При однаковому значенні еквівалентної частоти модуляції напруги АІН значення частоти перемикачів ключів вдвічі більше ніж у разі використання ШІМ. Зменшення кількості перемикачів ключів АІН можна досягнути, якщо здійснити розподіл імпульсів керування ( $g_1 \div g_4$ ) ключами Q1÷Q4 згідно вихідній напрузі РРС  $u_{hR}$  наступним чином:

$$u_R = u_{hR} \cdot \text{sign}(i_C^*),$$

$$g_1 = 1, \text{ if } u_R \geq 0 \text{ and } g_1 = 0, \text{ if } u_R < 0,$$

$$g_3 = 1, \text{ if } u_R \leq 0 \text{ and } g_3 = 0, \text{ if } u_R > 0,$$

$$g_2 = \bar{g}_1, \quad g_4 = \bar{g}_3.$$

За цього протягом напівперіоду один з ключів АІН відкрито, наприклад, при  $di_C^* > 0$  ключ Q1 відкритий і перемикаються Q3, Q4. Відповідно, кількість перемикачів ключів за період вдвічі менша за частоту перемикачів РРС. Для рівномірного завантаження ключів за струмом слід періодично змінювати порядок перемикачів ключа Q1 на Q4, Q3 на Q2.

Релейний метод формування струму є критичним до зміни швидкості струму завдання. Так, за наявності в навантаженні діодного випрямляча його струм, що споживається з РМ має імпульсний характер і похідна струму під час перемикачів діодів змінюється стрибком. Аналогічний характер має завдання струму АІН (рис.3). За достатнього для відпрацювання  $i_C^*$ , але обмеженого значення  $di_C/dt$  і зміні значення  $di_C^*/dt$  стрибком частота перемикачів РРС різ-



ко зменшується (на рис.3 період перемикавання РРС  $T_1$  порівняно з  $T$  збільшився майже вдвічі). Це призводить до появи «сплеску» в струмі мережі.

Придушення «сплеску» можливо загальним підвищенням частоти  $f_s$  у разі зменшення  $\delta$  згідно (1) при незмінній напрузі  $U(a)$ , але внаслідок зростання втрат потужності в ключах АІН можливості цього обмежені.

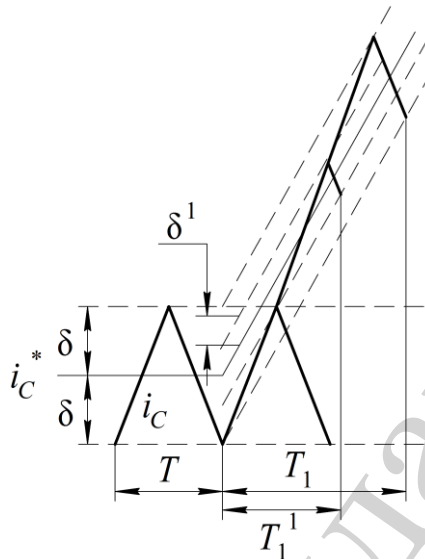


Рис. 3. Зміна похідної завдання струму АІН

Для послаблення впливу змін значення  $di_C^*/dt$  на частоту перемикавання РРС слід підвищувати  $di_C/dt$ , що досягається збільшенням  $U(a)$ . З геометричних співвідношень для рис.3 не важко показати, що відносне прирощення часу до досягнення струмом заданого відхилення  $\delta$  із зростанням  $di_C/dt$  зменшується. Відповідно, за постійного значення  $di_C^*/dt$  зменшується відносне значення зміни періоду (частоти) перемикань і «сплеск» у струмі мережі.

Ефективним засобом вирівнювання частоти перемикавання РРС виглядає змінювання завдання відхилення  $\delta$  згідно  $di_C^*/dt$ . У подальшому це визначено як динамічну компенсацію (DK). Так, у разі збільшення похідної  $di_C^*/dt$  значення  $\delta$  ( $\delta^1$  на рис. 3) зменшується з відповідним зростанням і вирівнюванням значення частоти перемикавання (на рис. 3 значення  $T_1^1 \approx T$ ).

Певні особливості має реалізація схеми за нелінійного реактору, коли його індуктивність змінюється згідно струму АІН і зменшується із зростанням його значення.

В загальному випадку  $L$  може змінюватись в декілька разів. Згідно (1) це призводить до збільшення  $di_C/dt$  і підвищення частоти перемикавання РРС. Внаслідок цього за значних амплітуд  $i_C$  вплив зміни похідної  $di_C^*/dt$  на частоту перемикавання зменшується. В зоні значень струму  $i_C$  близьких до максимального, отримуємо значні втрати енергії в ключах АІН. Для їх зменшення слід зменшувати частоту  $f_s$  (збільшувати  $\delta$ ). У разі убавання струму і зростанням  $L$  суттєво зменшується  $f_s$ . Отже виникає ще один фактор для появи «сплеску» у струмі

мережі. Регулювання  $\delta$  за нелінійного реактору не забезпечує постійної частоти перемикачів ключів АІН, але в певній мірі сприяє вирівнюванню її значення і придушенню «сплеску». Отже корегування відхилення  $\delta$  є доцільним здійснювати згідно амплітуди  $i_C^*$ .

#### 4. 4. Структура системи керування

Структура КРС (рис.4) містить: підсумкові пристрої, блоки множників, блок фазового автопідстроювання частоти PLL, релейний елемент RE, перетворювач С уніполярного сигналу RE в біполярний. Також використовуються: формувач-розподільувач імпульсів F, функціональний перетворювач FC, що формує задане значення відхилення  $\delta$  згідно значенню амплітуди  $i_C^*$  і задає режим модуляції, блок динамічної компенсації DK, який здійснює зміну значення  $\delta$  відповідно до похідної  $i_C^*$ .

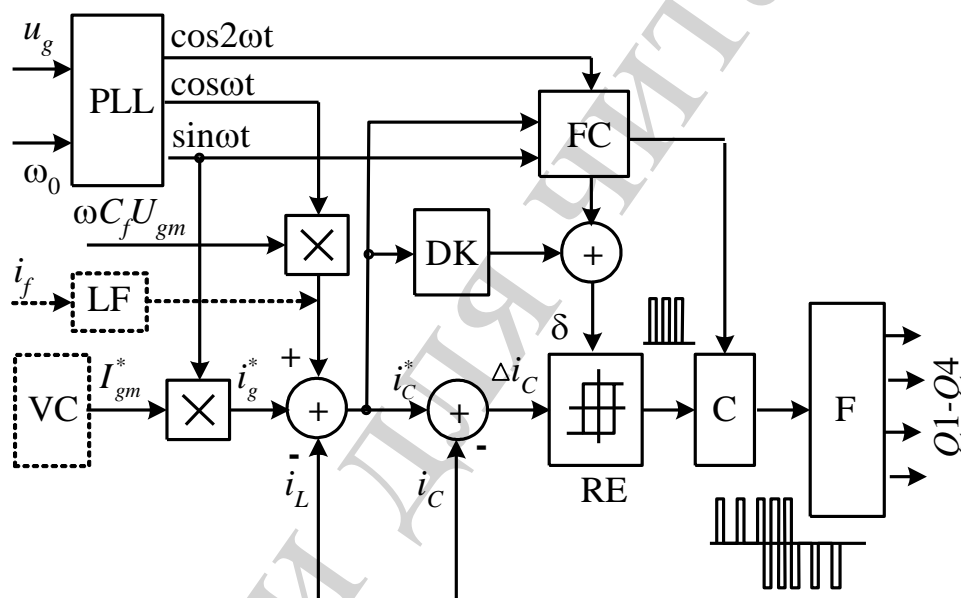


Рис. 4. Структура системи керування

Сигнал завдання амплітуди струму мережі  $I_{gm}^*$  формується зовнішнім регулятором напруги VC, який підтримує напругу на вході АІН на заданому рівні  $U=U^*$ . Відповідно  $I_{gm}^*$  формується синусоїдальний сигнал завдання струму мережі  $i_g^*$ . За генерації енергії СБ у мережу він зсунутий по відношенню до напруги  $u_g$  на  $180^\circ$ , а у разі споживання енергії з мережі співпадає за фазою.

Завдання струму мережевого АІН визначається з урахуванням струму навантаження  $i_L$  і розрахованого значення ємнісної складової (першої гармоніки) струму фільтра з амплітудою  $I_{fm(1)}=\omega C_f U_{gm}$ . Цей варіант можна використати і у разі несинусоїдальної напруги РМ.

На рис. 4 також наведено варіант використання зв'язку за струмом конденсатора фільтра (показано пунктиром). За цього сигнал з датчика струму пода-

ється через фільтр LF. Може бути використано і розраховане значення  $i_f = C du_g/dt$ . Використання фільтру LF обумовлено необхідністю придушення модуляційних складових струму. Це рішення у разі несинусоїдальної напруги РМ створює певні можливості щодо компенсації АІН вищих гармонік струму конденсатору. Це здійснюється також, як і для гармонік струму навантаження, і забезпечує покращення гармонійного складу струму РМ. Ці можливості обмежені внаслідок фазового зсуву вищих гармонік на виході LF і стосуються гармонік низького порядку 3-ї та 5-ї, для яких зсув за фазою мінімальний.

PLL згідно напрузі РМ  $u_g = U_{gm} \sin \omega t$  і заданому значенню кутової частоти  $\omega_0$  формує сигнали  $\sin \omega t$ ,  $\cos \omega t$ ,  $\cos 2\omega t$ .

#### 4. 5. Моделювання в Matlab та його результати

Моделювання здійснено згідно структур на рис.1, 4 з комбінуванням постійного нелінійного навантаження (некерований випрямляч з вихідним ємнісним фільтром і потужністю навантаження 900 Вт) та  $RL$  навантаження.

Живлення АІН здійснювалось від джерела постійної напруги. Загальна потужність навантаження  $P_L = 2745$  Вт і становить 0.5 від максимальної потужності АІН за  $I_{Lm(1)} = 19.8$  А,  $\phi_{(1)} = 27^\circ$ ). Модель РМ (220 В,  $f = 50$  Гц) містить опори  $R = 0.02$  Ом,  $X_{Lg} = 0.02$  Ом. Параметри фільтра  $R_f = 0.3$  Ом,  $C_f = 60$  мкФ. Мережевий АІН з  $I_{Cmax} = 25$  А ( $I_{Cmmax} = 35.35$  А). В разі несинусоїдальної напруги РМ використовується послідовне з'єднання джерел змінної напруги з відповідними значеннями частоти та амплітуди. Розглянуто використання лінійного реактору з  $R = 0.1$  Ом та  $L = 0.0042$  Гн ( $b = 0.15$ ) та нелінійного реактору з такими ж початковими параметрами.

Для оцінки ефективності розглянутих рішень використано блок визначення втрат енергії в ключах. Згідно з параметрами моделі АІН розглянуто використання IGBT модуля SK 25 GH 12T4 [20]. Враховувалися втрати потужності  $P_C$

і перемикання  $P_{sw}$ . За цього  $P_C = \frac{1}{T} \int_0^T u_v i_v dt$  ( $u_v$ ,  $i_v$  – миттєві значення напруги та

струму ключів (діоду та транзистору),  $T$  – період вихідної частоти). Значення  $i_v$  визначається у моделі АІН,  $u_v$  визначається згідно  $i_v$  відповідно з вихідною вольт-амперною характеристикою. Значення  $P_{sw}$  визначаються за залежностями енергії перемикання [20]  $E_{on} = f(i_{von})$ ,  $E_{off} = f(i_{voff})$  для транзистору і  $E_{rr}$  – для діоду згідно значенню  $i_v$  в момент перемикання ключів. Значення енергії задаються при стандартному значенні напруги  $U_{CT}$  ( $U_{CT} = 600$  В для класу за напругою 1200 В) і температури  $T_j = 150$  °С.

Для значень температури менших  $T_j$  втрати енергії зменшуються, тому для спрощення температура не враховувалась. Для перерахунку до фактичного значення напруги АІН  $U$  використано залежність  $E' = E \left( \frac{U}{U_{CT}} \right)^{K_v}$  ( $K_v = 1.35$  для

IGBT і  $K_v = 0.6$  для діода).

Значення струму ключів  $i_{von}$  і  $i_{voff}$  визначаються згідно передньому і задньому фронтам імпульсів струму. Як пристрій вибірки – зберігання з накопи-

ченням для підсумовування значень енергії перемикання використано інтегратор. Вимірювання здійснюється з усередненням за 4 періоди напруги РМ.

*Модель нелінійного реактору, індуктивність якого залежить від струму.* В бібліотеці SimPowerSystems відсутній елемент з керованим значенням індуктивності. Тому було використано стандартну модель трансформатору з нелінійною характеристикою магнітного кола (Saturable transformer), яка задається в табличному (кусочно-лінійному) вигляді відповідно значенню струму. В якості реактору використано первинну обмотку трансформатору. Заздалегідь, до використання в загальній моделі були виконані окремі дослідження щодо перевірки коректності отримання заданих значень індуктивності (від 0.0042 Гн до 0.00158 Гн) у робочому діапазоні струмів. За цього первинна обмотка підключалась до імпульсного джерела постійного струму і вимірювався її струм. Значення індуктивності визначалося відповідно до швидкості зміни струму на інтервалі підключення реактора до джерела.

Всі зіставлення показників здійснювались за однакового навантаження та близьких значень THDig у діапазоні заданих значень струму РМ  $I_{gm}^* = 2 \div 17.8$  А (17.8 А відповідає максимальному значенню амплітуди першої гармоніки струму АІН). Розглянуто роботу системи за синусоїдальної та несинусоїдальної напруги РМ.

*Синусоїдальна напруга РМ. Лінійний реактор з  $L=0.0042$  Гн.* Значення напруги на вході АІН ( $U$ ) з  $a=1.3$ . Оцінено вплив закону змінювання заданого значення відхилення  $\delta$ . Розглянуто 4 варіанти керування:

- 1 – за постійним значенням  $\delta$ ;
- 2 – із змінюванням  $\delta$  згідно (3);
- 3 – за постійним значенням  $\delta$  і ДК;
- 4 – із змінюванням  $\delta$  згідно (3) і ДК.

Варіанти 3 і 4 забезпечують найменші втрати енергії в ключах за близького їх значення. За близьких значень THDig варіант 4 дозволяє зменшити втрати потужності в ключах АІН на 35 % за струму  $I_{gm}^* = 2$  А (THDig=4.1 %, ККД  $\eta=0.976$  – визначалось з урахуванням втрат енергії в ключах АІН) і на 25 % за струму  $I_{gm}^* = 17.8$  А (THDig=0.68 %,  $\eta=0.977$ ).

*Нелінійний реактор.* Порівняно з  $L=\text{const}$  маємо загальне збільшення втрат енергії до 15 %. Вплив ДК дещо зменшується і для струму  $I_{gm}^* = 2$  А зменшення втрат до 22 %. Проте значення ККД, залишається придатним. Так за  $I_{gm}^* = 3$  А і  $I_{Lm(1)}=14.8$  А (THDig=3.36 %) ККД=0.977, при збільшенні навантаження за  $I_{gm}^* = 3$  А і  $I_{Lm(1)}=19.8$  А (THDig=3.36 %) ККД=0.974. Осцилограми напруги  $u_g$ ,  $u_C$ , струмів  $i_g$ ,  $i_C$ ,  $i_L$  та  $(di_C^* / dt)10^4$  для варіанту 3 за  $I_{gm}^* = 2$  А і THDig=4.1 % наведені на рис. 5. На рис. 6 наведено осцилограму і спектр струму  $i_g$  у разі відключення ДК за тих же умов – THDig=9.2 %.

У разі нелінійного реактору характер процесів щодо «сплеску» дещо змінюється. Вплив ДК та завдання  $\delta$  згідно (3) є суттєвим лише на початковій ді-

лянці характеристики реактору  $L(I_C)$  при  $I_C \approx 0.5 I_{C\text{MAX}}$ . Так за  $I_{gm}^* = 10$  А порівняно з  $\delta = \text{const}$  (на рис.7 маємо «боковий сплеск») це дозволяє практично виключити «сплеск» і зменшити втрати в ключах на 9 %. Із зростанням амплітуди струму  $i_C$  внаслідок зменшення індуктивності реактору швидкість змінювання струму  $i$ , відповідно, частота перемикань збільшуються. За цього ДК не потрібна і призводить до зростання втрат потужності.

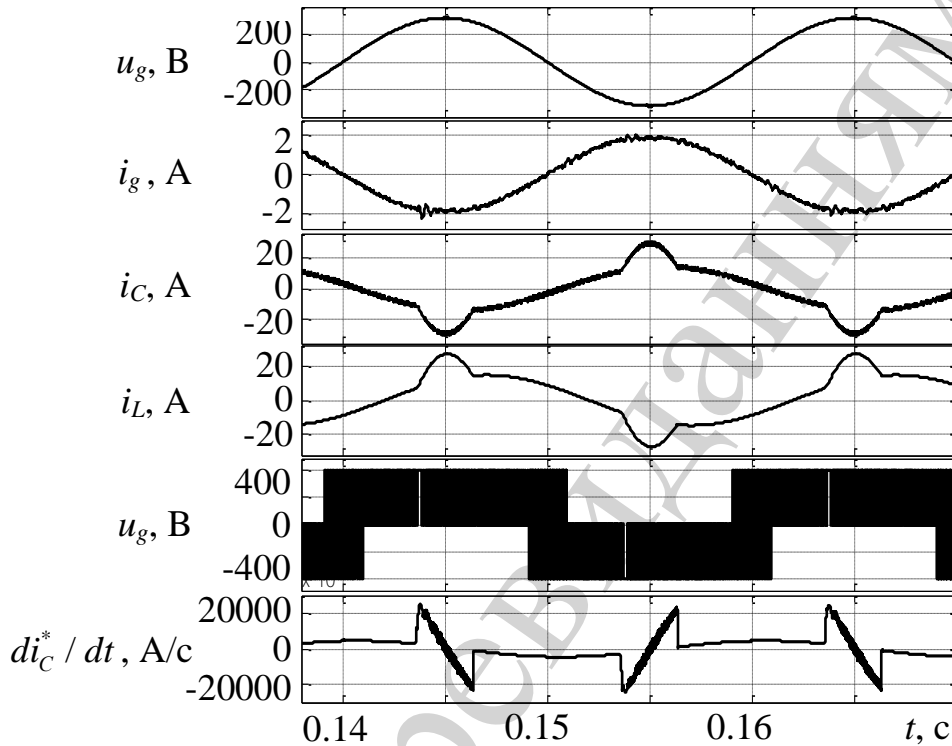


Рис. 5. Осцилограми  $u_g$ ,  $u_C$ ,  $i_g$ ,  $i_C$ ,  $i_L$  для варіанту 3

У даному випадку переслідуються мета зменшення частоти перемикання ключів за значень  $i_C^*$  близьких до максимальних та вирівнювання частоти перемикань при переході на лінійну ділянку  $L(I_C)$ . Система є стійкою в динаміці, що ілюструють осцилограми  $u_g$ ,  $u_C$ ,  $i_g$ ,  $i_C$ ,  $i_L$ ,  $(di_C^* / dt)10^4$  (рис.8) у разі зменшення  $RL$  навантаження у момент часу  $t=0.145$  с за постійного  $I_{gm}^* = 5$  А.

**Несинусоїдальна напруга РМ.** В табл. 1 наведені значення максимальної швидкості змінювання струму завдання АІН  $(di_C^* / dt)^*$  за наявності в напрузі РМ окремих гармонік з кратністю  $n$  до основної та всіх одночасно (all) до  $di_C^* / dt = 29000$  А/с (за даних параметрів навантаження) при синусоїдальній напрузі РМ ( $n=1$ ). Значення гармонік обрані відповідно з [15]. З іншого боку стандарт [15] обмежує загальне значення  $\text{THDu}_g$  напруги на рівні 8 %. Тоді виходячи з

того, що  $\left(\frac{di_C}{dt}\right)_{\text{MIN}} = \frac{(a-1)U_{gm}}{L}$  можна вважати достатнім  $a=1.6$  ( $U=500$  В).

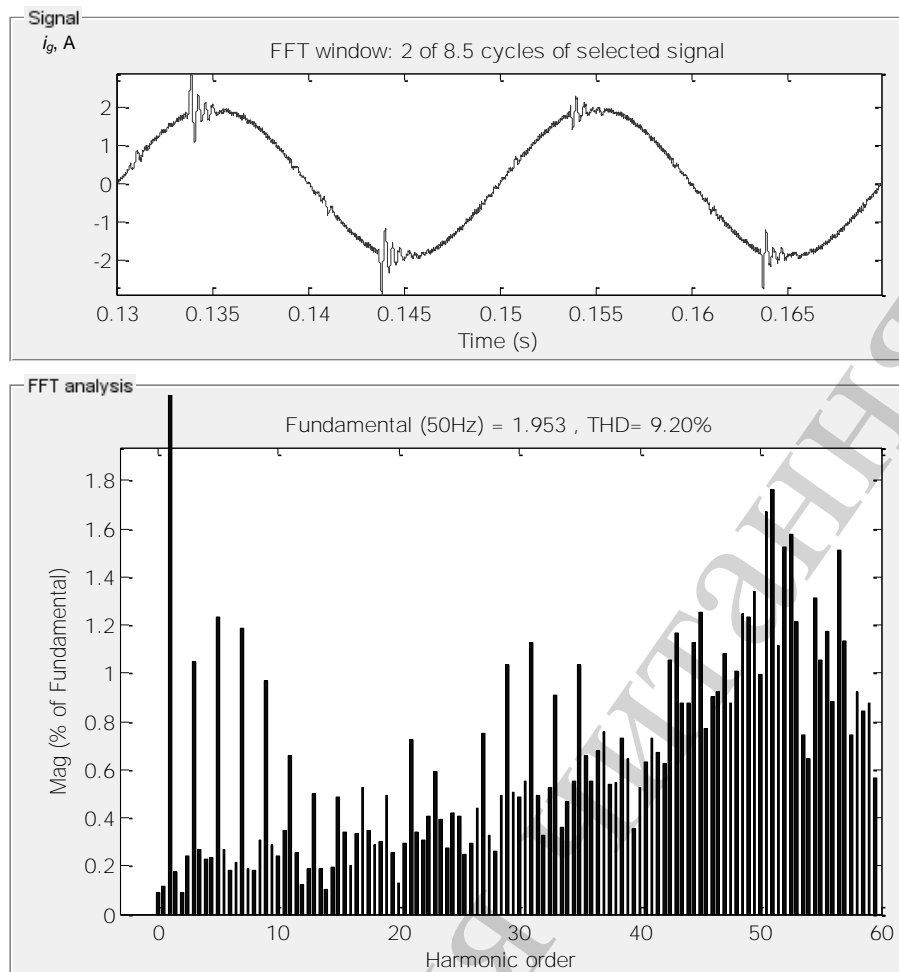


Рис. 6. Осцилограма і спектр струму  $i_g$  у разі відсутності ДК

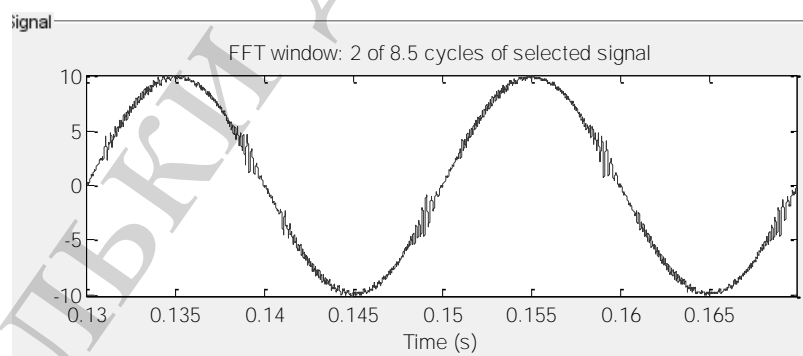


Рис. 7. «Бокові сплески» на осцилограмі струму  $i_g$  при використанні нелінійного реактора

Ємність  $C_f$  і опір  $R_f$ . Значення ємності конденсатора фільтра зменшено вдвічі до 30 мкФ, що дозволяє за синусоїдальної напруги РМ і  $U=500$  В отримати за  $I_{gm}^* = 3$  А значення  $THDi_g=4.22$  %. У разі введення зв'язку за струмом  $i_{cf}$  в канал формування завдання струму АІН виключення впливу модуляційних

складових струму забезпечується за значення опору  $R_f=0.8$  Ом в сполученні з фільтром LF зі сталою часу  $4 \cdot 10^{-4}$  с. В цьому разі система є стійкою до збурень.

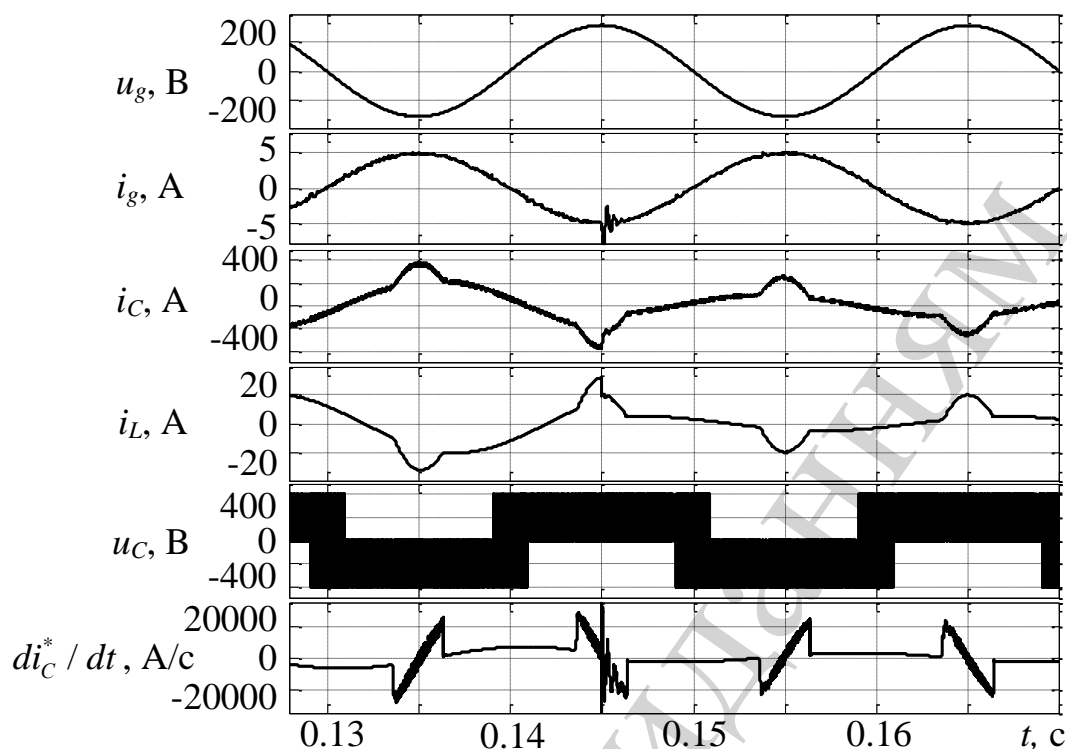


Рис. 8. Осцилограми  $u_g$ ,  $u_C$ ,  $i_g$ ,  $i_C$ ,  $i_L$  і  $di_C^* / dt$  при змінюванні навантаження

Таблиця 1

Відносне значення максимальної швидкості змінювання струму завдання АІН

$n$	1	3	5	7	9	11	13	all
$(di_C^* / dt)^*$ , в. о.	1	0.82	1.5	1.41	0.93	1.59	1.26	2.24

Найкращі показники у разі використання зв'язку за струмом  $i_{Cf}$  для компенсації впливу несинусоїдальної напруги РМ досягаються у разі завдання значення  $\delta$  згідно (3) у поєднанні з ДК. В табл.2 наведені значення  $THDi_g$  за наявності в напрузі РМ гармоніки з порядком  $n$  у разі використання зв'язку за струмом  $i_{Cf}$  для мінімальних значень  $I_{gm}^*$ , коли забезпечується  $THDi_g \leq 5\%$ .

Отже, за наявності 3-ї та 5-ї гармонік напруги РМ значення  $THDi_g \leq 5\%$  підтримується у діапазоні значень струму РМ, починаючи з  $I_{gm}=5$  А і вище. На рис.9 наведені осцилограми за наявності 3-ї та 5-ї гармонік і на рис. 10 за наявності всіх гармонік. Також в табл.2 для цих же значень струму наведені значення  $THDi_{g1}$  за відсутності компенсації.

Таблиця 2  
Значення  $\text{THDi}_g$

$n$	$I_{gm}^*$ , A	$\text{THDi}_g$ , %	$\text{THD}^*i_g$ , %
3	3	4.25	15.3
5	4	4.8	22.7
3+5	5	3.9	20.3
7	5.5	4.75	19.2
3+5+7	6	4.98	24.1
9	3.5	4.68	12.3
11	8	5	14.7
13	9.5	4.9	12.6
17	10.5	4.8	10.1
all	16.5	4.98	15

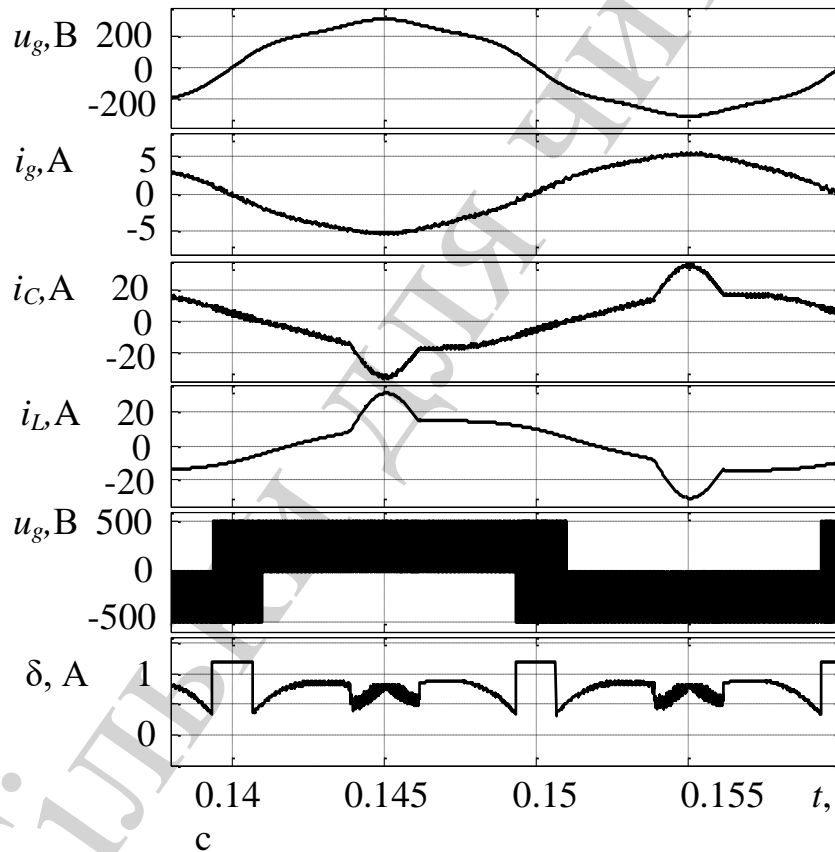


Рис. 9. Осцилограми  $u_g$ ,  $u_C$ ,  $i_g$ ,  $i_C$ ,  $i_L$ ,  $\delta$  за наявності 3<sup>rd</sup>, 5<sup>th</sup> гармонік  $u_g$

Збільшення напруги на вході АІН до  $U=500$  В призводить до зростання втрат потужності в ключах АІН порівняно з  $U=405$  В. Так  $I_{gm}^* = 3$  А зростання втрат становить 18 % (ККД=0.971,  $\text{THDi}_g=4.22$  %), за  $I_{gm}^* = 10$  А – 17 % (ККД=0.971,  $\text{THDi}_g=1.45$  %), за  $I_{gm}^* = 17.8$  А – 15 % (ККД=0.97,  $\text{THDi}_g=0.8$  %).



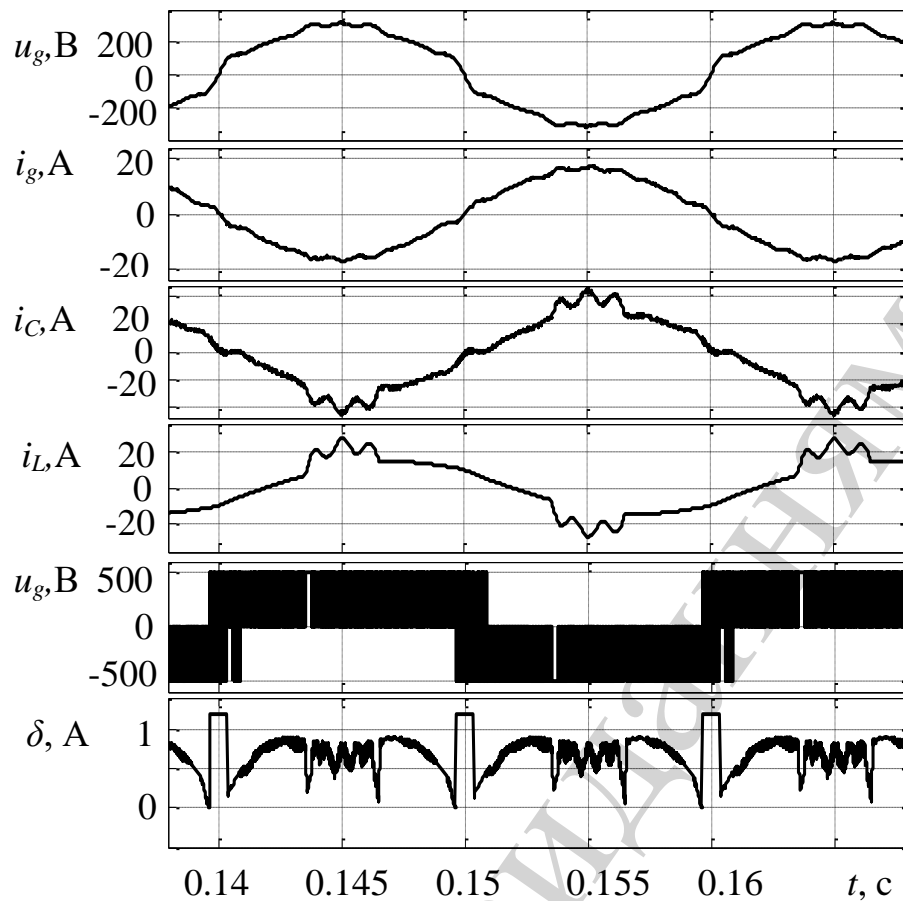


Рис. 10. Осцилограми  $u_g$ ,  $u_C$ ,  $i_g$ ,  $i_C$ ,  $i_L$ , за наявності 3<sup>rd</sup>, 5<sup>th</sup>, ... 17<sup>th</sup> гармонік  $u_g$

## 5. Обговорення результатів дослідження з удосконалення КРС багатофункціонального мережевого інвертора КСЕ

Забезпечити значення  $\text{THDi}_g \leq 5\%$  без збільшення фільтра та частоти перемикань ключів без погіршення ККД АІН можливо:

- для лінійного реактора за рахунок стабілізації та зменшення частоти перемикання  $f_s$  ключів АІН. Це досягається шляхом регулювання заданого значення відхилення РРС відповідно до напруги мережі з урахуванням похідної сигналу завдання струму АІН. При постійному значенні  $f_s$  перевага РРС порівняно з ШІМ полягає в тому, що в процесі формування струму відсутня похибка;

- для нелінійного реактора формування заданого значення відхилення РРС здійснюється з урахуванням амплітуди струму АІН. У зоні малих амплітуд струму при  $L = \text{const}$  відхилення струму формується, як для лінійного реактора. Зі збільшенням амплітуди струму значення  $f_s$  вирівнюється в часі. На ділянках в зоні значень, близьких до амплітуди, частота зменшується за рахунок збільшення завдання відхилення; при зменшенні струму частота збільшується за рахунок зменшення завдання відхилення;

- введенням зв'язку за струмом конденсатора фільтра в канал формування завдання струму АІН. Це дасть можливість компенсувати вищі гармоніки низького порядку, які обумовлені несинусоїдальною напругою РМ.

Ця робота є розвитком роботи [16], де пропонується використовувати РРС за комбінованої модуляції напруги АІН та постійного значення заданого відхилення РРС. У цьому випадку забезпечення гармонійного складу струму можливо при достатньо високій  $f_s$ . Особливістю запропонованих рішень є цілеспрямоване регулювання завдання відхилення РРС зі зниженням  $f_s$ . Одночасно були враховані можливості використання нелінійного реактора та роботи АІН за несинусоїдальної напруги РМ.

Певні обмеження щодо застосування результатів роботи пов'язані з тим, що:

- значення напруги на вході АІН за несинусоїдальної напруги РМ отримано для конкретної швидкості зміни струму нелінійного навантаження – випрямляча з вихідним ємнісним фільтром;

- як нелінійний реактор була використана модель з певною залежністю  $L(I_C)$ , коли при струмі до  $I_C \approx 0.5 I_{C\text{MAX}}$  значення  $L = 0.0042$  Гн, а потім зменшується в 2,65 рази.

Дослідження щодо використання нелінійного реактора на даному етапі роботи є оціночними. Їх мета - виявити можливість компенсації збільшення швидкості змінювання струму АІН зі зменшенням  $L$  шляхом зміни відхилення РРС. Це обмежить і вирівняє значення  $f_s$  за період напруги мережі. Проблема полягає в тому, що зменшення індуктивності відбувається при великих струмах АІН. У цьому випадку «сплеск» не суттєво впливає на якість струму, але втрати енергії на комутацію збільшуються. Це призводить до неприпустимого зниження ККД інвертора.

Розвиток цієї роботи пов'язаний із встановленням залежностей відхилення РРС у разі використання нелінійного реактора відповідно до миттєвого значення струму. Питання забезпечення необхідних показників мережевого АІН за несинусоїдальною напругою РМ підлягають більш глибокому дослідженню. Проблема полягає в тому, що стандарт визначає значення  $\text{THD}_{\text{ug}} \leq 8\%$  за наявності гармонік напруги до 40-ї. Можливості їх компенсації залежать від порядку гармонік.

## 6. Висновки

1. Досліджено механізм формування струму АІН та виникнення «сплеску» струму сітки. Отримано залежність заданого відхилення для РРС, використання якої з лінійним реактором забезпечує майже постійну частоту комутації ключів АІН. Для придушення «сплеску» пропонується використовувати динамічну компенсацію за похідною струму АІН у процесі формування заданого значення відхилення РРС. Для нелінійного реактора зі збільшенням амплітуди струму АІН внаслідок збільшення частоти комутації ключів динамічна компенсація не є ефективною. Поява "сплеску" в цьому випадку пов'язана з різкою зміною індуктивності. Придушення "сплесків" досягається відповідною зміною заданого значення відхилення РРС.

2. Показано, що за несинусоїдальної напруги РМ для забезпечення якості струму мережі слід враховувати зростання швидкості змінювання струму завдання, що обумовлює відповідне збільшення напруги на вході АІН. Також потрібно виключити вплив гармонік струму конденсатору фільтру у точці підключення до РМ. Повна або часткова компенсація цих гармонік можлива з введенням зв'язку за струмом конденсатора в канал формування завдання струму

АІН при відповідних значеннях ємності конденсатора і опору послідовно з'єданого з ним резистору.

3. Розроблено структуру системи управління АІН з використанням релейного контролера струму за комбінованої модуляції вихідної напруги. У цьому випадку задане відхилення для релейного регулятора регулюється відповідно до завдання амплітуди та похідної струму АІН. Це дозволяє отримати  $THD \leq 5\%$  для РСС майже в усьому діапазоні струму. У поєднанні з модифікованим алгоритмом перемикавання ключів це забезпечує ефективність принаймні 97 % при врахуванні втрат потужності в ключах АІН.

4. Детальна математична модель для ПК була розроблена для всебічного вивчення роботи системи "РМ – мережевий інвертор – навантаження", включаючи визначення втрат потужності в ключах. Модель навантаження разом з лінійним RL навантаженням містить нелінійне навантаження – випрямляч із заданим значенням швидкості зміни вхідного струму. Можливо отримати необхідний гармонійний склад напруги РМ, використовувати лінійний або нелінійний реактор. Це дозволило провести дослідження при несинусоїдальній напрузі РМ і використанні нелінійного вихідного реактора. Результати були використані для уточнення значення напруги на вході АІН та завдання відхилення РСС.

### Подяка

Даний матеріал містить результати досліджень, отриманих під час виконання науково-дослідних робіт, фінансування яких здійснювалось при підтримці Міністерства освіти і науки України: 0117U000605 «Принципи створення енергоефективних перетворювальних агрегатів комбінованих систем електроживлення з поновлюваними джерелами» і 0118U000232 «Розроблення системи енергоефективного управління мікроенергетичними мережами локальних об'єктів з традиційними та поновлюваними джерелами».

### Література

1. Ko, S.-H., Lee, S.-R., Dehbonei, H., Nayar, C. V. (2006). A Grid-Connected Photovoltaic System with Direct Coupled Power Quality Control. IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. doi: <https://doi.org/10.1109/iecon.2006.347757>
2. Zeng, Z., Yang, H., Zhao, R., Cheng, C. (2013). Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24, 223–270. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.033>
3. Шавёлкин, А. А. (2018). Структуры однофазных преобразовательных агрегатов для комбинированных систем электроснабжения с фотоэлектрическими солнечными батареями. Технічна електродинаміка, 2, 39–46. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.039>
4. Shavelkin, A., Shvedchykova, I. (2018). Multifunctional converter for single-phase combined power supply systems for local objects with a photovoltaic solar battery. Tekhnichna Elektrodynamika, 2018 (5), 92–95. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.092>

5. Vigneysh, T., Kumarappan, N. (2017). Grid interconnection of renewable energy sources using multifunctional grid-interactive converters: A fuzzy logic based approach. *Electric Power Systems Research*, 151, 359–368. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.06.010>
6. Brochures. ABB solar inverters. URL: <https://new.abb.com/power-converters-inverters/solar>
7. 519-1992 - IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. doi: <https://doi.org/10.1109/ieeestd.1993.114370>
8. 1547-2018 - IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. doi: <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2018.8332112>
9. Da Silva, S. A. O., Sampaio, L. P., Campanhol, L. B. G. (2014). Single-phase grid-tied photovoltaic system with boost converter and active filtering. 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). doi: <https://doi.org/10.1109/isie.2014.6865013>
10. Martins, D. C., de Souza, K. C. A. (2008). A Single-Phase Grid-Connected PV System With Active Power Filter. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 2 (1), 50–55.
11. Vaquero, J., Vázquez, N., Soriano, I., Vázquez, J. (2018). Grid-Connected Photovoltaic System with Active Power Filtering Functionality. *International Journal of Photoenergy*, 2018, 1–9. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/2140797>
12. Mendez, I., Vazquez, N., Vaquero, J., Vazquez, J., Hernandez, C., Lopez, H. (2015). Multifunctional grid-connected photovoltaic-system controlled by sliding mode. *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. doi: <https://doi.org/10.1109/iecon.2015.7392286>
13. Шавьолкін, О. О. (2019). Удосконалення структури контура регулювання струму з використанням ШІМ для мережевого інвертора комбінованої системи електроживлення. *Технічна електродинаміка*, 3, 37–45. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.037>
14. Ma, T.-T. (2012). Power Quality Enhancement in Micro-grids Using Multifunctional DG Inverters. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. Vol. II, IMECS 2012. Hong Kong*, 996–1001.
15. Mao, H., Yang, X., Chen, Z., Wang, Z. (2012). A Hysteresis Current Controller for Single-Phase Three-Level Voltage Source Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27 (7), 3330–3339. doi: <https://doi.org/10.1109/tpel.2011.2181419>
16. Shavolkin, O., Shvedchykova, I. (2018). Forming of Current of the Single-Phase Grid Inverter of Local Combined Power Supply System with a Photovoltaic Solar Battery. 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). doi: <https://doi.org/10.1109/ieps.2018.8559540>
17. Wu, T.-F., Nien, H.-S., Shen, C.-L., Chen, T.-M. (2005). A Single-Phase Inverter System for PV Power Injection and Active Power Filtering With Nonlinear Inductor Consideration. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41 (4), 1075–1083. doi: <https://doi.org/10.1109/tia.2005.851035>

18. Machado, S. M., Da Silva, N. (2016). Stability and Harmonic Rejection Analysis of Single-Phase Grid-Connected Inverter Intended for Renewable Energy Systems Considering Distorted Grid Conditions. 2016 CIGRE C4 International Colloquium on EMC, Lightning and Power Quality Considerations for Renewable Energy Systems. URL: <https://www.researchgate.net/publication/299524329>
19. IEEE Std EN 50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.
20. IGBT Modules. SEMIKRON. URL: <https://www.semikron.com/products/product-classes/igbt-modules.html>
21. Шавьолкін, О. О., Становський, Є. Ю., Підгайний, М. О. (2019). Моделювання комбінованої системи електроживлення локального об'єкту з багатофункціональним перетворювальним агрегатом фотоелектричної батареї. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну, 4 (136), 20–33. doi: <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2019.4.2>